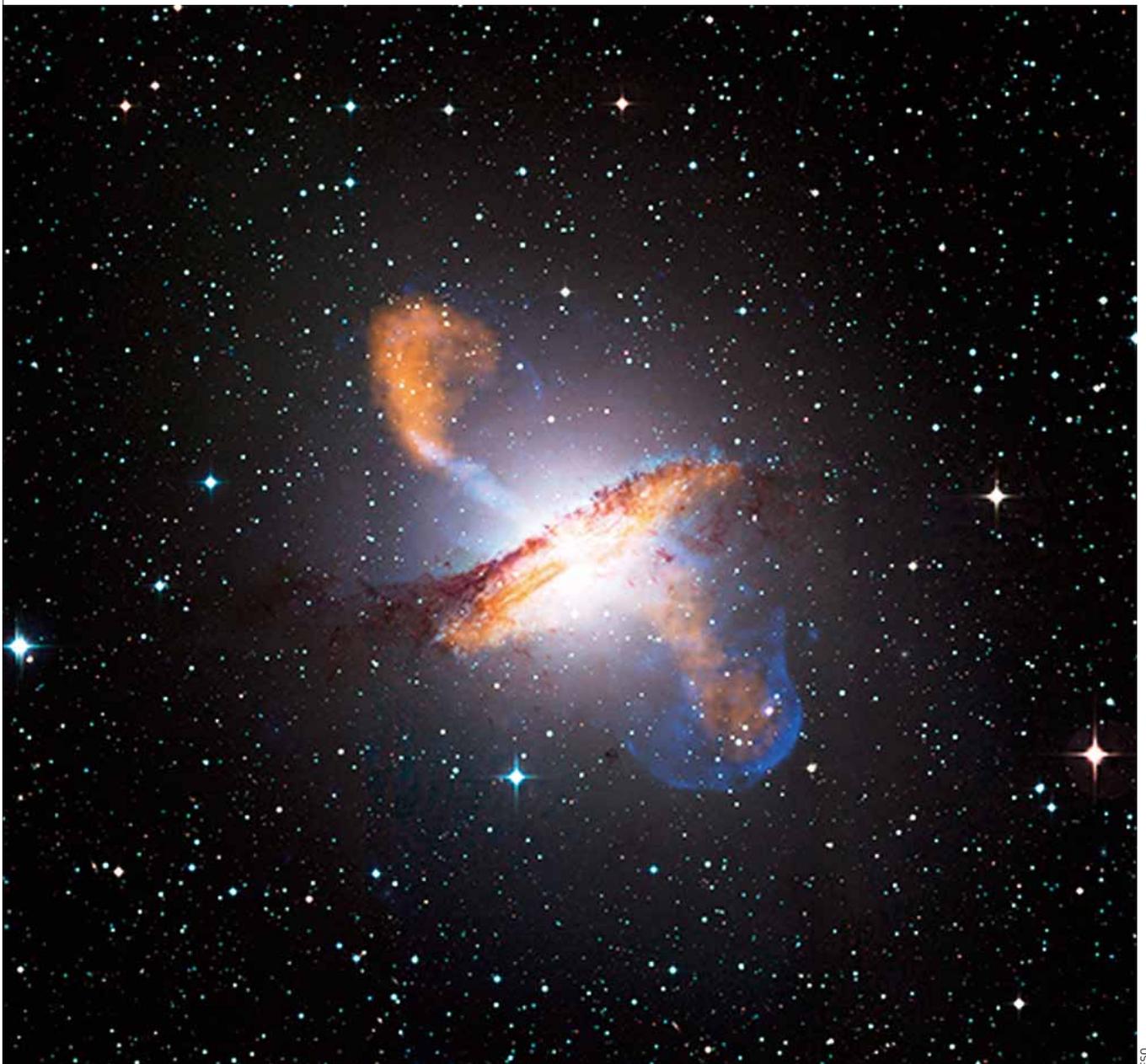


Des spectro-imageurs de nouvelle génération

En même temps que l'Année mondiale de l'astronomie, 2009 célébrera le 400^e anniversaire des premières observations faites avec une lunette astronomique, par Thomas Harriot et Galileo Galilei, sur les montagnes lunaires, les taches solaires, les phases de Vénus ou encore les satellites de Jupiter. **Aujourd'hui, les astrophysiciens ne se contentent plus de télescopes posés à terre mais envoient leurs observatoires dans l'espace pour mieux scruter l'Univers.** Parmi les instruments embarqués figurent les spectro-imageurs capables de faire, à la fois, de la spectrométrie et de l'imagerie. La contribution du CEA a été particulièrement significative dans la conception, le développement, la construction, la qualification de ces instruments dont une nouvelle génération est en train de naître.



Centaurus A, vue en optique, en ondes submillimétriques (orange) et en rayons X (bleu).

Observer l'Univers dans le domaine de la lumière submillimétrique

Le 14 mai 2009, Herschel et Planck, deux satellites de l'Agence spatiale européenne (ESA) dont le poids avoisine les cinq tonnes, ont été lancés ensemble par une fusée Ariane 5, à partir du Centre spatial guyanais de Kourou, et placés sur une orbite solaire à 1,5 million de kilomètres de la Terre, plus précisément au point de Lagrange L2, considéré comme le meilleur endroit accessible pour observer les rayonnements de longueurs d'onde submillimétriques et millimétriques.

Le CEA, fortement soutenu par le Cnes, a contribué au développement, à la réalisation et à la qualification de deux des trois instruments embarqués par Herschel. Il s'agit de PACS (pour *Photodetector Array Camera and Spectrometer*) et de SPIRE (pour *Spectral and Photometric Imaging Receiver*), deux spectro-imageurs bolométriques de moyenne résolution : le premier efficace dans la gamme spectrale 60-210 μm et le second entre 200 et 650 μm .

Dans le froid des premiers temps galactiques

Herschel, avec son miroir de 3,5 mètres de diamètre, est le plus grand télescope spatial placé en orbite à ce jour. Conçu au profit de l'ensemble de la communauté astronomique mondiale, il embarque un imposant cryostat de 2 500 litres d'hélium, liquide superfluide destiné à refroidir les instruments à des températures inférieures à $-271\text{ }^\circ\text{C}$. Pour les astrophysiciens, il s'agit de minimiser l'émission infrarouge et submillimétrique du nouvel observatoire et donc d'augmenter le contraste des sources observées.

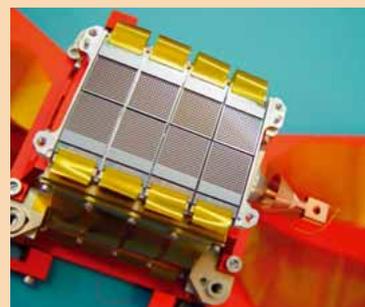
Le télescope spatial Herschel va ouvrir une nouvelle fenêtre d'observation, celle donnant sur l'Univers froid. Là s'initient les phases les plus précoces de la gestation des étoiles mais aussi les étapes les moins connues de l'évolution des galaxies. Il faut dire, qu'à ce jour, les modèles mis à la disposition des chercheurs en matière de formation et d'évolution s'avèrent encore insuffisamment confrontés à la réalité des observations. La première cause en est que ces phénomènes ne sont pas lisibles en lumière visible, mais uniquement dans l'infrarouge lointain et au-delà. Or, ces gammes de longueur d'onde souffrent d'une forte absorption du rayonnement par l'atmosphère. Herschel remédie à cette situation en apportant des mesures de température et de densité de matière, en révélant les espèces moléculaires en jeu, mais aussi en apportant des informations sur la dynamique des objets étudiés. L'autre raison permettant de comprendre l'insuffisance des détecteurs actuels tient aussi à l'opacité atmosphérique. Il aura fallu attendre le début des années 1990 et l'apparition des premiers détecteurs bolométriques pour que les chercheurs disposent enfin d'instruments suffisamment sensibles pour mesurer le rayonnement dans le domaine millimétrique.

L'observatoire Herschel a grandement contribué au développement de ces bolomètres aux longueurs d'onde inférieures au millimètre et à stimuler les recherches technologiques en la matière (voir encadré).



Le 14 juin 2009, le télescope spatial Herschel, alors situé à plus d'un million de kilomètres de la Terre, a porté son premier regard sur une galaxie. Cette image de l'Univers dans l'infrarouge submillimétrique, avec une finesse de résolution inédite, a été saisie par la caméra de bolomètres de l'instrument PACS, conçue et réalisée par le CEA.

Un bolomètre (du grec *bolè* qui signifie « radiation » et *metron*, « la mesure ») est un détecteur thermique de rayonnement. Il s'agit donc d'un dispositif capable de mesurer un flux d'énergie incident, porté par des photons ou des particules massives, et de le convertir en chaleur. Pour une quantité d'énergie donnée, plus la masse (donc la capacité calorifique) du dispositif est faible, plus l'élévation de température s'avère importante. À très basse température, ce phénomène s'amplifie par une forte chute de la capacité calorifique de la matière.



Le bolomètre est une sorte de thermomètre ultrasensible, capable de détecter d'infimes variations de température (quelques millièmes de degré). Ici, le plan focal bolométrique 32x64 pixels de l'instrument PACS.



À droite : une vue d'artiste du satellite Herschel dont le télescope et l'instrumentation ont été placés au-dessus d'un réservoir d'hélium. À gauche : Herschel étudiera les sites de formation d'étoiles dans une gamme d'énergie inexplorée (image de Rho Ophiucus vue par le satellite ISO).



Le cryostat d'Herschel contient 2 500 litres d'Hélium, ce qui assure à la mission une autonomie d'environ 3 ans. Il maintient l'ensemble du plan focal à une température de -271°C . Le télescope est, quant à lui, refroidi passivement à -200°C grâce à une protection thermique.

Défis technologiques en chaîne

La contribution matérielle du CEA a été particulièrement significative concernant le spectro-imageur PACS. D'abord, par une implication pluristructurale incluant l'Institut nanosciences et cryogénie (Inac) et l'Institut de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu), tous deux faisant partie de la Direction des sciences de la matière, avec le Laboratoire d'électronique et de technologies de l'information (Leti) de la Direction de la recherche technologique. Ensuite, parce que cette coopération

a permis de réaliser une caméra complète, incluant les détecteurs, le **cryoréfrigérateur** $0,3\text{ K}$, la mécanique et l'électronique nécessaire au pilotage ainsi qu'à l'acquisition des données et, bien sûr, les matrices de bolomètres spécialement développées pour les besoins de la mission.

Aujourd'hui, les équipes du CEA ont maîtrisé la réalisation de plans focaux de plusieurs milliers de **pixels** par des procédés de fabrication collective, dérivés de la micro-technologie du silicium développée par le Leti. Il s'agit d'un bond technologique comparé à l'offre des autres laboratoires se contentant seulement de quelques dizaines voire de quelques centaines de détecteurs. Leur limitation résulte des dispositifs mis en place pour capter le rayonnement : cornets en face de chaque détecteur, sphères intégrant, assemblage manuel de chaque pixel, etc. Nos avancées ont bénéficié du contexte exceptionnel des années 1990, marquées par l'essor de la micro-électronique, notamment avec l'avènement de puces capables de contenir différents types de capteurs obtenus par gravure profonde et collective du silicium (micro-accéléromètres pour les *airbags* équipant les véhicules automobiles, détecteurs de méthane destinés à l'habitat...). À cet élan technologique s'ajoutait une circulation de l'information plus détendue que celle qui avait été en vigueur au cours des années précédentes : des idées anciennes concernant l'absorption des ondes **électromagnétiques** sont redevenues au goût du jour. Elles ont été adaptées au problème de la détection par les équipes du Leti pour être compatibles avec les procédés de fabrication collective. Plus rien ne s'opposait à la réalisation de grandes matrices de détecteurs.

Reste, pour les chercheurs, à relever un autre défi, celui de faire en sorte que la sensibilité des nouveaux détecteurs ne soit plus limitée que par les fluctuations de rayonnement émanant du miroir du télescope (pourtant refroidi à près de -200°C). Jusqu'à présent, les détecteurs nus dont la surface n'atteint pas le mm^2 , pouvaient déjà distinguer l'équivalent d'une ampoule électrique de 100 Watt située à 300 km de là. Avec le télescope Herschel, l'observatoire fera bien mieux en détectant une source analogue mais placée, cette fois, à la distance de la Lune ! Parvenir à une telle performance suppose de refroidir chaque bolomètre, véritable détecteur thermique de rayonnement, à une température bien plus basse que celle de l'instrument, soit $0,3\text{ K}$. Pour atteindre cette température dans l'espace, les chercheurs recourent à des cryoréfrigérateurs à évaporation d'hélium (^3He) en circuit fermé, développés par le Service des basses températures (SBT) du CEA. La principale difficulté soulevée par ce type de système réside dans le « budget » de puissance totale disponible sur le plan focal, à savoir $10\ \mu\text{W}$ – puissance indispensable pour la polarisation, la lecture, les connexions électriques et mécaniques des détecteurs. La mise au point d'un **multiplexage** astucieux a permis aux chercheurs de mettre en œuvre 2 560 bolomètres opérationnels sur la caméra de PACS, dans ce « budget » de puissance, alors que l'instrument SPIRE, de facture plus classique bien que pourvu du même cryoréfrigérateur, n'en pilote que 300 !



Il faut travailler sur la problématique du refroidissement des détecteurs embarqués sur les satellites, pour que ceux-ci marchent parfaitement durant au moins dix ans. Les cryoréfrigérateurs refroidissent les détecteurs à quelques centaines de millikelvins. Ici, essais thermiques sur le cryoréfrigérateur de rechange du satellite Herschel.

Ces détecteurs se répartissent en deux plans focaux dans les gammes respectives de 60 à 130 μm et 130 à 210 μm . Dans la caméra, leur distribution permet de cartographier la même zone du ciel mais à des longueurs d'onde différentes. À plus courte longueur d'onde, la complexité du plan focal s'établit à 64 x 32 pixels, ce qui permet de bénéficier au mieux de la résolution du grand miroir d'Herschel ; en revanche, une complexité de 32 x 16 pixels suffit aux plus grandes longueurs d'onde. Chaque plan focal est formé de modules 16 x 16 pixels « aboutables » sur trois côtés. Et comme les détecteurs présentent une large bande spectrale d'absorption, le montage des modules s'opère indifféremment sur l'une ou l'autre des voies optiques. Seuls les filtres optiques placés devant chaque plan focal définissent alors la gamme de longueurs d'onde. Chaque pixel du module correspond à un bolomètre silicium préalablement hybridé, au moyen d'une bille en indium, à un circuit de lecture et de multiplexage en technologie CMOS (pour *Complementary Metal Oxide Semiconductor*)⁽¹⁾. L'opération d'hybridation conduit à trois fonctionnalités :

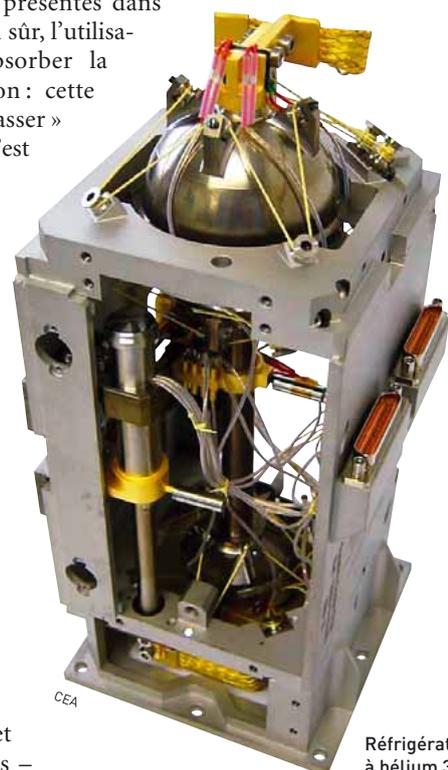
- l'interconnexion électrique habituelle du bolomètre au circuit de lecture ;
- la réalisation d'une cavité optique pour piéger efficacement la lumière incidente ;
- la tenue mécanique et la thermalisation du bolomètre.

La taille des billes d'hybridation a été calculée pour que la cavité résonnante s'accorde à la longueur d'onde à absorber. Cette cavité comprend la grille bolométrique ainsi qu'un réflecteur situé sur le circuit CMOS : elle favorise l'absorption maximale de l'onde incidente, proche de l'unité. L'absorption s'effectue dans un métal déposé sur la grille et dont l'impédance de surface est adaptée à celle du vide.

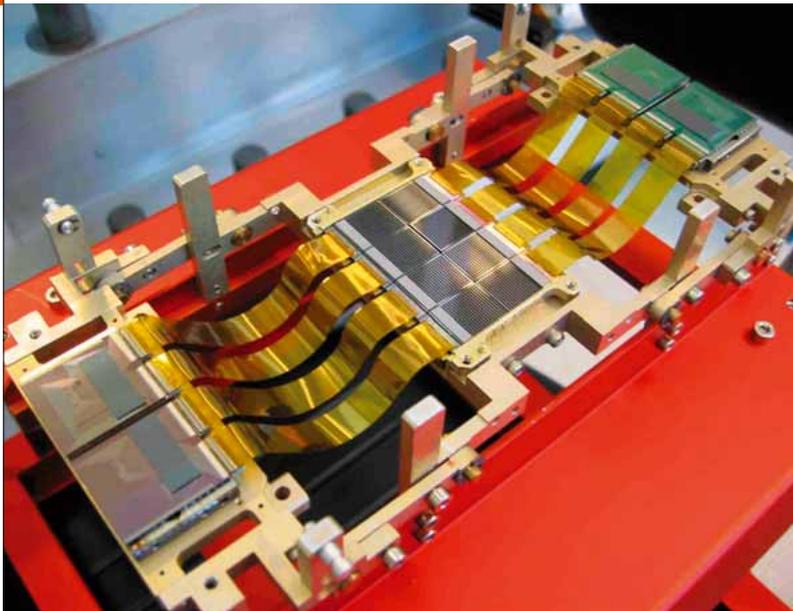
(1) Succédant aux transistors bipolaires, la technologie CMOS consiste à fabriquer des composants électroniques à faible consommation électrique dédiés à la conception des processeurs.

Quant à la grille bolométrique en silicium, elle se trouve suspendue par des poutres très fines ($\approx 2 \mu\text{m}$) et faiblement conductrices de la chaleur. Ce dispositif permet au rayonnement ténu absorbé d'induire une élévation mesurable de sa température. Enfin, un thermomètre en silicium dopé, situé au centre de la grille, réalise la mesure en exploitant une loi exponentielle de la résistance avec la température. Il révèle un coefficient de température de près de 3 000 %/K. Comparée à une surface « pleine », la grille présente un double avantage : d'abord, celui de posséder une masse calorifique plus faible garantissant une vitesse de réponse thermique ; ensuite, celui d'offrir une moindre susceptibilité aux particules cosmiques ionisantes présentes dans l'environnement spatial. Bien sûr, l'utilisation d'une grille pour absorber la lumière peut poser question : cette lumière n'allait-elle pas « passer » par les trous de la grille ? Ce n'est pas le cas pour la bonne raison que la lumière ne « distingue » pas les détails inférieurs à sa longueur d'onde. Il suffit donc de fabriquer une grille d'un pas inférieur à la longueur d'onde à détecter.

Concernant les modules 16 x 16, chacun d'entre eux fut évalué individuellement lors de campagnes de tests réalisées entre 2003 et 2005. Au vu des performances, ils ont été intégrés dans les plans focaux et étalonnés une première fois. Ensuite, une fois la caméra complète intégrée dans l'instrument PACS – cryoréfrigérateur et l'électronique de vol compris –



Réfrigérateur à hélium 3.



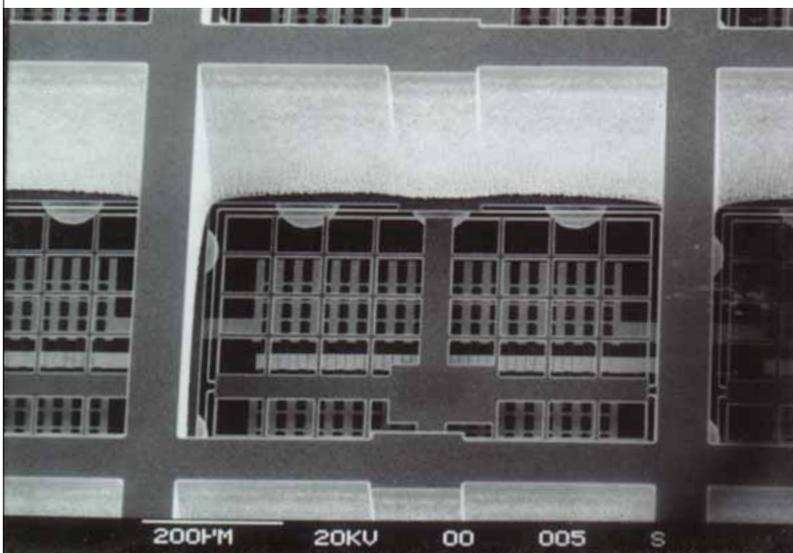
Un des plans focaux bolométriques (32 x 64 pixels) équipant l'instrument PACS.

un étalonnage final a pu être opéré en deux étapes : la première, réalisée sur le centre du CEA de Saclay, en 2006, et la seconde, à Garching (Allemagne), l'année suivante. Au début de l'année 2008, ce fut au tour de l'instrument PACS de prendre place à bord du satellite Herschel avec SPIRE et HIFI (pour *Heterodyne Instrument for Far-Infrared*). Les derniers ajustements réalisés (changement des connecteurs défectueux du satellite, re-routage des câbles pour éviter les perturbations dues aux panneaux solaires...), le satellite fut déclaré « bon pour le service » en décembre 2008.

Perspectives

Actuellement, les équipes ayant développé cette caméra submillimétrique tendent leurs efforts vers deux directions.

- La première consiste à pousser les matrices de bolomètres de PACS vers les plus grandes longueurs d'onde afin de les installer sur de grands télescopes



Photographie au microscope électronique à balayage d'un pixel bolomètre.

au sol. L'opération nécessite l'adaptation préalable de ces matrices aux différentes « fenêtres » atmosphériques, c'est-à-dire aux différentes bandes spectrales étroites où l'atmosphère (en altitude) n'est pas totalement opaque (200, 350, 450 et 865 μm). L'intérêt de ce travail ne réside pas tant dans la sensibilité des mesures (impossible de rivaliser avec le spatial !) que dans l'utilisation de très grands télescopes (12 à 15 mètres de diamètre) capables d'offrir des pouvoirs séparateurs bien plus importants. Leur adaptation aux plus grandes longueurs d'onde se fera surtout par l'augmentation de la taille des billes d'hybridation.

- L'autre voie concerne le développement de détecteurs beaucoup plus sensibles destinés aux futures missions spatiales.

Aujourd'hui, deux projets bénéficient déjà de ces développements. Il s'agit d'ArTeMiS (pour Architecture de bolomètres pour des télescopes submillimétriques au sol), une caméra bolométrique de 5 000 pixels destinée au télescope APEX (pour *Atacama Pathfinder Experiment*), installé au Chili, et de PILOT (pour *Polarized Instrument for Long wavelength Observation of the Tenuous interstellar medium*), expérience dotée de deux plans focaux, montés dans une caméra embarquée sous ballon, pour mesurer l'émission polarisée du rayonnement en provenance de la **Voie lactée**.

Enfin, l'optimisation du bolomètre devrait également pouvoir servir à diverses applications à très faible flux de fond. C'est le cas de SPICA (pour *Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics*), mission spatiale conduite par l'**Agence japonaise (JAXA)** en collaboration avec l'**Agence spatiale européenne (ESA)**, dont le lancement interviendra à l'horizon 2018. Ce télescope spatial utilisera le même miroir qu'Herschel mais refroidi à -268 °C ! Pour optimiser au maximum cette nouvelle configuration, les chercheurs devront augmenter la sensibilité des détecteurs d'un facteur 100 au minimum. Pour atteindre une telle sensibilité (puissance de bruit de 10^{-18} watts), le refroidissement du bolomètre silicium sera abaissé jusqu'à 0,05 Kelvin.

Afin de répondre aux défis lancés par cette nouvelle mission, le CEA s'est engagé dans une phase d'études préliminaires. Par exemple, les chercheurs du SBT travaillent déjà à la conception d'un cryoréfrigérateur à désaimantation **adiabatique** pour l'espace. SPICA devrait ouvrir la voie à d'autres projets passionnants comme les expériences FIRI (pour Interférométrie bolométrique dans l'espace) ou BPOL (pour Mesure de la **polarisation** du fond cosmologique à 3 K).

> Patrick Agnese

Département d'optronique
Laboratoire d'électronique
et de technologies de l'information (Leti)
Direction de la recherche technologique (DRT)
CEA Centre de Grenoble

> Louis Rodriguez

Service d'astrophysique (SAP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles
(CEA-Université de Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)